

Erläuterungen zur Nuklidkarte

herausgegeben vom Bundesministerium
für Atomkernenergie und Wasserwirtschaft

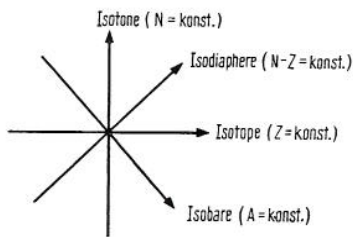
bearbeitet durch die

Kernreaktor Bau- und Betriebs-GmbH, Karlsruhe

Literatur berücksichtigt bis Oktober 1958

ERLÄUTERUNGEN ZUR NUKLIDKARTE

In die Nuklidkarte sind die bis zum Oktober 1958* bekannten 267 stabilen, über 1030 instabile Kernarten (Nuklide), sowie mehr als 220 Isomere aufgenommen worden (Definition siehe weiter unten). Sie sind nach steigender Protonenzahl Z (Kernladungszahl, Ordnungszahl) und Neutronenzahl N geordnet. Diese ursprünglich von E. SEGRÉ vorgeschlagene Anordnung, die auch von G. FRIEDLANDER und M. L. PEARLMAN in der „General Electric Chart of the Nuclides“ verwendet wird, ergibt, daß die Isotope (Nuklide gleicher Protonenzahl Z) eines Elementes waagrecht nebeneinander, die Isotone (Nuklide gleicher Neutronenzahl N) senkrecht übereinander stehen. Isobare (Kerne gleicher Massenzahl A) befinden sich auf der Diagonalen von links oben nach rechts unten. Isodiaphere (Kerne gleichen Neutronenüberschusses $N-Z$) auf der Diagonalen von links unten nach rechts oben.



Kennzeichnung und Einordnung der verschiedenen Nuklidarten

Alle Nuklide sind in der obersten Zeile durch das Elementsymbol und die Massenzahl, die gleich der Summe der Protonen und

Neutronen (Nukleonen) ist, gekennzeichnet. Stabile Nuklide sind als schwarze Felder mit weißem Druck dargestellt. Man erkennt auf der Karte eine diagonal von links unten nach rechts oben verlaufende Anhäufung der stabilen Kerne, die das Energietal darstellt (Linie größter isobarer Bindungsenergie, auch β -Stabilitätslinie genannt). Links davon findet man Kerne mit Neutronendefizit, die sich durch Positronenemission oder Einfang eines Hüllenelektrons in stabile Kerne umwandeln (Rote Felder). Rechts befinden sich Kerne mit Neutronenüberschuß, die unter Negatronenemission zerfallen (Blaue Felder). Im Bereich der schweren Kerne ist der α -Zerfall häufig (Gelbe Felder). Bei den leichtesten Kernen zerfällt der durch eine radioaktive Umwandlung gebildete hochangeregte Tochterkern in Heliumkerne bzw. spaltet Heliumkerne ab. Diese Kerne sind daher keine α -Strahler im eigentlichen Sinne. Kerne, die auf verschiedene Art zerfallen können, sind durch zweifarbige Felder dargestellt.

Isomere Kerne sind definiert als Kerne gleicher Kernladungs- und Massenzahl, die sich nur durch ihren Energiegehalt voneinander unterscheiden. Sie sind durch senkrechte Abgrenzungen in den Feldern dargestellt. Der angeregte Zustand wird durch den Buchstaben J gekennzeichnet.

Links außerhalb der Felderreihe steht jeweils die Kernladungszahl. Im ersten stark umrandeten Feld ist das Elementzeichen angegeben. Unter ihm steht das chemische Atomgewicht bei natürlicher Isotopenzusammensetzung; darunter der Einfangsquerschnitt für thermische Neutronen in barn (siehe Wirkungsquerschnitt).

Die Neutronenzahl ist unter jeder zweiten senkrechten Kolonne angegeben.

Zeichenerklärung:

Schwarzes Feld

stabiles Nuklid mit Angabe der Massenzahl, Isotopenhäufigkeit und Isotopeneinfangsquerschnitt für thermische Neutronen in barn.

Farbiges bzw. weißes Feld

Radionuklide. Hier ist außer der Massenzahl die Halbwertszeit, Art und Energie der emittierten Kernstrahlung angegeben; genauere Daten siehe Nuclear Data Sheets bzw. Reviews of Modern Physics (Vol. 30, Number 2, Part. 2, April 1958) und für Nuklide mit Halbwertszeiten länger als 1 Stunde auch Nuklidliste der Firma Telefunken.

Rotes Feld

Positronen-Strahler (β^+) bzw. Hüllenelektronen-Einfang (K)

Blaues Feld

Negatronen-Strahler (β^-)

Gelbes Feld

α -Strahler

Zweifarbiges Feld

Verzweigungszerfall, z. B. β^+ , K und β^- oder β^- und α .

Durch senkrechte Linien unterteilte Felder

isomere Zustände mit Halbwertszeiten $> 10^{-8}$ sec.

Feld, oberes Drittel schwarz gekennzeichnet

in der Natur vorkommendes Radionuklid. (Eine strenge Abgrenzung zwischen natürlichen und nicht natürlichen Radionukliden ist nicht möglich, da man mit der Verbesserung der Meßtechnik extreme Verzweigungsverhältnisse auffand und auch Np^{237} und Pu^{239} nachweisen konnte, die durch natürliche Neutronenstrahlung laufend gebildet werden.)

Feld mit kleiner schwarzer Fläche

Abkömmling eines der 3 natürlichen Mutternuklide Th^{232} , U^{235} , U^{238} . Der historische Isotopenname ist mit weißen Druckbuchstaben in der schwarzen Fläche aufgeführt (siehe Übersicht: Die natürlichen radioaktiven Familien).

Pfeile

Spaltisobare (isobare Zerfallsreihen der Spaltprodukte, die bei der Spaltung schwerer Kerne entstehen). Siehe Übersicht: Spaltprodukte bei der Spaltung von U^{235} mit thermischen Neutronen.

* Als Literaturquellen wurden vorwiegend die Nuclear Data Sheets des National Research Council verwendet.

Erklärungen der verwendeten Abkürzungen:

a = Jahre
d = Tage
h = Stunden
m = Minuten
s = Sekunden, ms = Millisekunden, μ s = Mikrosekunden
 σ = Einfangquerschnitt von Elementen oder Nukliden für thermische Neutronen in barn
 σ_t = Spaltquerschnitt für thermische Neutronen
 α = Alpha-Teilchen
 β^- = Negatron
 β^+ = Positron
K = Hüllenelektronen-Einfang
 γ = Photon
J = Jomoter Zustand
 e^- = Konversionselektron
n = Neutron
p = Proton
Sp = Spontanspaltung (Halbwertszeiten der Spontanspaltung siehe Tabelle am Schluß dieser Erläuterungen)

Genauere Nukliddaten, Zerfallsschemata etc. sind aus den Nuclear Data Sheets des NRC zu ersehen.

Elemente

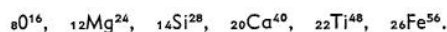
Nuklide gleicher Kernladungszahl aber unterschiedlicher Massenzahl bezeichnet man als Isotope eines Elements. Da die Kernladungszahl, bzw. die ihr gleiche Zahl der Hüllenelektronen den chemischen Charakter eines Nuklids bestimmt, sind Isotope chemisch nicht unterscheidbar.

Als natürliches Element bezeichnet man die auf der Erde vorliegende, praktisch konstante Isotopenzusammensetzung eines Elements. Einige natürliche Elemente haben nur ein stabiles Isotop, z. B. ^4Be , ^{13}Al , ^{15}P und ^{55}Cs (Reinelemente). Die meisten sind ein Gemisch von bis zu 10 stabilen bzw. natürlichen radioaktiven Isotopen, deren prozentuale Häufigkeit oft sehr unterschiedlich ist.

Bis heute sind 102 Elemente bekannt; 90 davon haben natürliche Isotope. Von den anderen 12 Elementen — ^{43}Tc , ^{61}Pm und die Transurane ^{93}Np , ^{94}Pu , ^{95}Am , ^{96}Cm , ^{97}Bk , ^{98}Cf , ^{99}Es , ^{100}Fm , ^{101}Md und ^{102}No — sind alle Isotope nur künstlich herstellbar. Von den Elementen ^{83}Bi , ^{84}Po , ^{85}At , ^{86}Em (Rn), ^{87}Fr , ^{88}Ra , ^{89}Ac , ^{90}Th , ^{91}Pa und ^{92}U gibt es keine stabilen Isotope, jedoch kommt mindestens ein Radioisotop als Glied einer radioaktiven Familie in der Natur vor.

Stabile Nuklide

Etwa $\frac{1}{3}$ (159) der 267 stabilen Nuklide sind Kerne mit gerader Protonen- und Neutronenzahl (gg-Kerne). Auch gewichtsmäßig sind gg-Kerne am häufigsten. Über 80% der Erdkruste besteht aus folgenden gg-Kernen:



Alle Kerne mit ungerader Protonen- und Neutronenzahl (uu-Kerne) mit Ausnahme der ersten vier H, Li, B, N, sind instabil. Kerne mit ungerader Protonen- und gerader Neutronenzahl (49 ug-Kerne) und Kerne mit gerader Protonen- und ungerader Neutronenzahl (53 + 2 vermutlich instabile gu-Kerne) sind etwa gleich häufig.

Die Verteilung der stabilen Isotope unterliegt gewissen Gesetzen. Nach der ASTONschen Isotopenregel können Elemente mit ungerader Ordnungszahl höchstens 2, Elemente mit gerader Ordnungszahl dagegen mehrere stabile Isotope besitzen. Der MATTHEWSche Isobarensatz sagt: Kerne mit ungerader Massenzahl haben nur 1 stabiles Isobar; Kerne mit gerader Massenzahl können mehrere stabile Isobare haben, deren Kernladungszahlen sich jedoch um 2 Einheiten unterscheiden müssen (letzte

scheinbare Ausnahmen: ^{123}Te , ^{123}Sb ; ^{113}In , ^{113}Cd). Aus massenspektroskopischen Daten ist anzunehmen, daß ^{123}Te und ^{113}Cd instabil sind.

Kernbindungsenergie

Bei der Kernbildung aus Protonen und Neutronen wird Energie frei, denn die Masse eines Nuklids ist kleiner als die Massensumme der entsprechenden Zahl freier Protonen und Neutronen. Je größer dieser Massendefekt eines Nuklids ist, desto fester sind die Nukleonen im Kern gebunden. Der Massendefekt wird in Atommasseneinheiten (ME) ausgedrückt, die definitionsgemäß gleich $\frac{1}{16}$ der Masse des Atoms ^{16}O ist. Nach der Einstein'schen Gleichung $E = m \cdot c^2$ entspricht eine Atommasseneinheit $1,49 \cdot 10^{-32}$ erg oder 931 MeV. Die Kernbindungsenergie beträgt demnach etwa 7—9 MeV je gebundenes Nukleon und etwa 0,9% der Kernmasse. Sie ist für jede Kernart eine charakteristische Größe.

Trägt man die Kernbindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Zahl A der im Kern vorhandenen Nukleonen auf, so ergibt sich die in der Fig. 1 dargestellte Kurve.

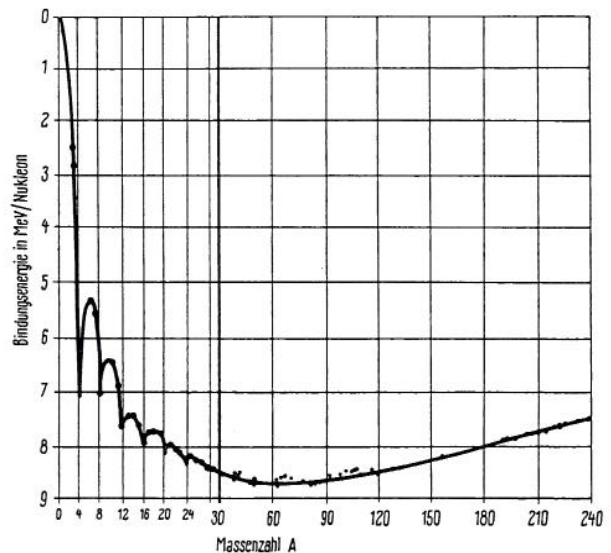


Fig. 1 Bindungsenergie pro Nukleon in Abhängigkeit von der Massenzahl

Die Kernbindungsenergie pro Nukleon nimmt bei leichten Kernen zu, hat bei Eisen ihren höchsten Wert und nimmt bei schweren Kernen wieder ab. Bei den schwersten Kernen ist die den Kern zusammenhaltende Bindungskraft kaum größer als die ihn auseinandertreibenden elektrostatischen Kräfte, so daß eine relativ kleine Anregungsenergie ausreicht, um die schweren Kerne in zwei Kerne mittlerer Massenzahl zu spalten. Die freiwerdende Spaltungsenergie ist gleich der Kernbindungsenergie-differenz des gespaltenen Kernes und der beiden Bruchstücke (siehe Kernspaltung). Weiterhin läßt sich aus Fig. 1 ablesen, wieviel Energie bei der Helium-Bildung, d. h. bei der Fusion leichter Kerne gewonnen wird.

Stellt man sich im Diagramm der Atomkerne die Kernbindungsenergie pro Nukleon in der dritten Dimension aufgetragen vor, so ist Fig. 1 der Längsschnitt durch das „Energietal der Atomkerne“. Ein Querschnitt durch das „Tal“ ist ein Isobarenschnitt, wie er in Fig. 2 und 3 dargestellt ist. Man trägt die Kernbindungsenergie der Isobaren relativ zum Kern mit der größten Kernbindungsenergie auf. Hierbei ergeben sich zwei verschiedenartige Schnitte bei ungerader und gerader Massenzahl (Fig. 2 und Fig. 3). Die Höhendifferenz zwischen zwei Isobaren ist der Massendifferenz dieser beiden Kerne proportional und wird bei radioaktiven Kernen als Zerfallsenergie (Q-Wert bzw. Q_β -Wert) bezeichnet.

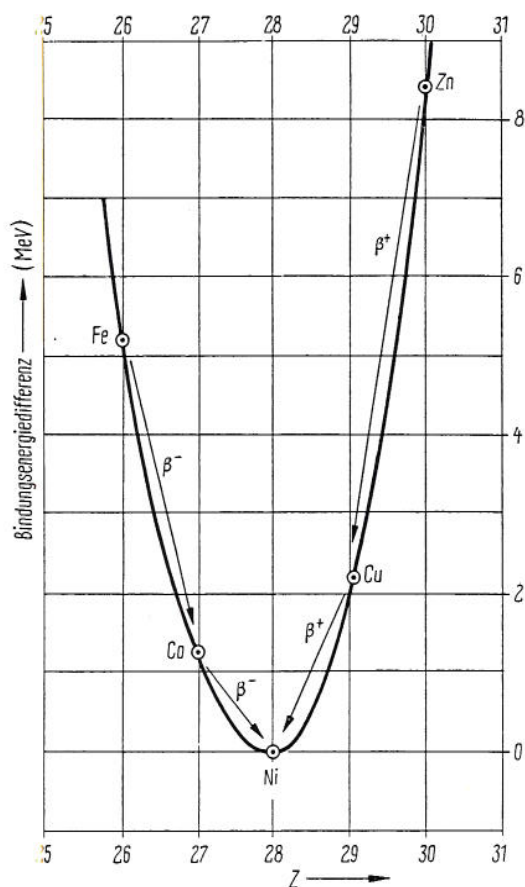


Fig. 2 Isobaren-Schnitt $A = 61$

Magische Zahlen

Die Nuklidkarte weist an mehreren Stellen zwei dicke Linien in senkrechter und waagrechter Richtung auf, zwischen denen Kerne mit besonders ausgezeichneten Protonen- bzw. Neutronenzahlen stehen. Bei diesen Zahlen handelt es sich um die sogenannten magischen Zahlen 2, 8, 20, 28, 50, 82 und 126. In einer Analogie zum Schalenmodell des Atoms nimmt man an, daß die Nukleonen auf Schalen angeordnet sind. Kerne mit abgeschlossenen Neutronen- bzw. Protonenschalen besitzen eine besonders hohe Bindungsenergie. Das bestätigt sich im Auftreten zahlreicher stabiler Isotope im Verlauf dieser Linien und auch in ihrem Häufigkeitsanteil im Isotopengemisch. 5 stabile Kerne mit $N = 2$, 5 stabile Kerne mit $N = 8$, 5 stabile Kerne mit $N = 20$, 7 stabile Kerne mit $N = 28$, 10 stabile Kerne mit $N = 50$, 13 stabile Kerne mit $N = 82$, 2 stabile Kerne mit $N = 126$.

Die stabilen Endprodukte der 3 natürlichen Zerfallsreihen (Bleiisotope) haben eine magische Protonenschale ($Z = 82$). Das häufigste Bleiisotop hat außerdem eine abgeschlossene Neutronenschale von 126 Neutronen.

Kerne mit magischen Neutronenzahlen haben einen besonders kleinen Neutroneneinfangquerschnitt, während Kerne, denen ein Neutron zu einer abgeschlossenen Schale fehlt, einen extrem hohen Neutroneneinfangquerschnitt besitzen, z. B. ${}_{54}\text{Xe}_{81}^{135}$ mit $2,7 \cdot 10^6$ barn (siehe Wirkungsquerschnitt).

Die Neutronenstrahler geben weitere Hinweise für die Schalenstruktur. Alle Neutronenstrahler haben ein oder wenige Neutronen mehr, als einer abgeschlossenen Schale entspricht. Diese Neutronen sind sehr locker gebunden und können daher aus angeregten Kernen, wie sie nach einem β -Zerfall vorliegen, abgestrahlt werden.

* bedeutet angeregter Zustand

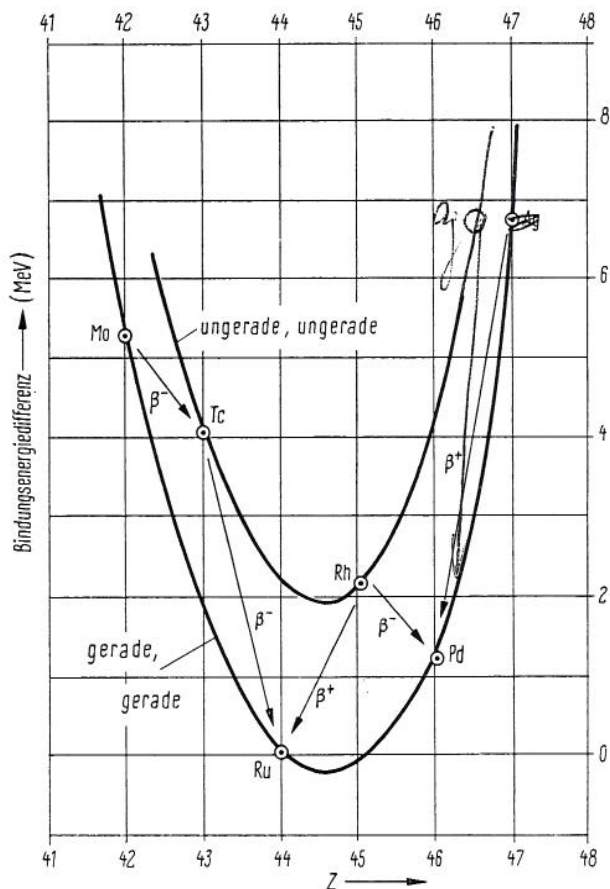
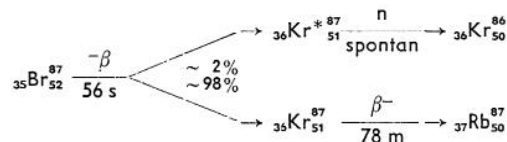


Fig. 3 Isobaren-Schnitt $A = 102$

Z. B.:



Radionuklide

Von mehr als 1000 Radionukliden kommen über 60 in der Natur vor, während alle anderen durch künstliche Kernprozesse (s. Kernreaktionen) erzeugt werden müssen. Die natürlichen Radionuklide gehören zum größten Teil den radioaktiven Familien an (Thorium-, Actinium- und Uran-Radium-Familie). Sie sind Abkömmlinge der langlebigen Kerne Th^{232} , U^{235} und U^{238} und gehen schließlich in die Bleiisotope 208, 207 bzw. 206 über (s. Übersicht: „Die natürlichen radioaktiven Familien“). Die 4. radioaktive Familie, Neptunium-Familie genannt, ist in der Natur ausgestorben, da die Halbwertszeit des langlebigsten zugehörigen Nuklids (Np^{237} , $T = 2,2 \cdot 10^6$ a) klein ist gegenüber dem Erdalter von über 10^9 a. Folgende natürliche langlebige Isotope sind seit der Entstehung der Kerne noch nicht vollständig zerfallen:

| | | | | | |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| K^{40} | β^- , K | $1,28 \cdot 10^9$ a | Lu^{176} | β^- | $2,2 \cdot 10^{10}$ a |
| V^{50} | K | $4,8 \cdot 10^{14}$ a | Ta^{180} | K, β^+ | $2 \cdot 10^{13}$ a |
| Rb^{87} | β^- | $5 \cdot 10^{10}$ a | W^{180} | α | 10^{17} a |
| In^{115} | β^- | $6 \cdot 10^{14}$ a | Re^{187} | β^- | $5 \cdot 10^{10}$ a |
| La^{138} | K | $1,1 \cdot 10^{11}$ a | Pt^{190} | α | $6 \cdot 10^{11}$ a |
| Ce^{142} | α | $5 \cdot 10^{15}$ a | Pt^{192} | α | 10^{15} a |
| Nd^{144} | α | $5 \cdot 10^{15}$ a | Pb^{204} | α | $1,4 \cdot 10^{17}$ a |
| Sm^{147} | α | $1,2 \cdot 10^{11}$ a | Bi^{209} | α | $2 \cdot 10^{17}$ a |

Kernreaktionen

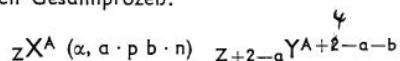
Alle Nuklide können durch Kernreaktionen künstlich in andere umgewandelt werden. Zuerst wird ein metastabiler, hochangeregter Zwischenkern gebildet, der spontan unter Emission von Kernteilchen und Photonen in ein neues Nuklid übergeht. Die Bildung eines hochangeregten Zwischenkerns kann auf verschiedenen Wegen erfolgen:

1. durch Beschuß eines Nuklids mit geladenen Partikeln, wie z. B. $p(^1\text{H}^+)$, $d(^2\text{H}^+)$, $t(^3\text{H}^+)$, $\alpha(^4\text{He}^+)$, $^{12}\text{C}^{12+}$.
2. durch Neutronen, die als Sekundärprodukte von Kernreaktionen mit geladenen Partikeln bzw. bei Spaltungsprozessen emittiert werden.
3. durch Photonen, worunter man γ -Strahlen versteht, die z. B. bei Kernreaktionen und Spaltungsprozessen oder bei der Bremsung hochenergetischer Elektronen entstehen.

Der Zwischenkern erhält seine Anregungsenergie aus zwei energieliefernden Vorgängen: durch die Absorption der kinetischen Energie des auftreffenden Partikels und durch die beim Verschmelzen des Partikels mit dem Kern frei werdende Kernbindungsenergie.

Der Zwischenkern zerfällt dann spontan — je nach der Höhe seiner Anregungsenergie — unter Emission von Nukleonen oder durch Absplittung von leichten Kernen (Partielle Kernverdampfung, spallation — sp —) oder auch durch Spaltung in zwei mittelschwere Kerne (fission — f —). Ist die Anregungsenergie nicht höher als die Nukleonenbindungsenergie, so findet keine Kernreaktion statt, sondern der Zwischenkern geht durch Photonenemission in den Grundzustand über.

Beim Zerfall eines Zwischenkerns können verschiedene Endkerne gebildet werden, d. h., es können eine größere oder kleinere Zahl von Nukleonen emittiert werden. Die Anregungsenergie muß selbstverständlich größer sein als die Bindungsenergie aller abgespaltenen Nukleonen. Die Kernreaktionsgleichung beschreibt den Gesamtprozeß:



X ist der Ausgangskern mit der Kernladungszahl Z und Massenzahl A. In der Klammer steht vor dem Komma das die Reaktion auslösende Partikel und hinter dem Komma die vom Zwischenkern abgestrahlten Protonen und Neutronen, wobei a und b ganze Zahlen einschließlich Null sind. Y ist der Endkern der Reaktion mit der Massenzahl $A + 2 - a - b$ und der Ladungszahl $Z + 2 - a$. Bei Kernreaktionen werden meist γ -Strahlen emittiert, welche in der Reaktionsgleichung oft nicht erwähnt werden.

Einige Beispiele für die wichtigsten Reaktionstypen sind:

(n, γ) (γ, n) (α, d) (d, α) (n, p) (n, α) (d, p) (γ, p) (p, sp) $(d, 2n)$ (α, pn) $(\alpha, 3n)$ $(n, 2n)$ (d, f) (n, f) unelastische Streuung (n, n) , elastische Streuung $(n, n\gamma)$.

f (fission) = Spaltung;

sp (spallation) = Absplittung

Einige spezielle Beispiele:

${}^6\text{Li} (n, \alpha) {}^3\text{H}$ (Tritium); ${}^{59}\text{Co} (n, \gamma) {}^{60}\text{Co}$; ${}^{59}\text{Co} (d, p) {}^{60}\text{Co}$; ${}^{235}\text{U} (n, f)$ Spaltprodukte

Wirkungsquerschnitt

Der Wirkungsquerschnitt σ einer Reaktion, bei der Teilchen der Sorte A auf Kerne der Sorte B geschossen werden, wird definiert als Verhältnis der Zahl der die Reaktion auslösenden Teilchen zur Zahl der durch die Flächeneinheit fliegenden Teilchen; er gibt also die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Reaktion zwischen A und B an. Anschaulich bildet jeder Kern B hinsichtlich einer Reaktion eine Fläche der Größe σ für die Teilchen A. σ hängt außer von der Teilchen- und Kernart auch von der Energie der einfallenden Partikel ab. Er wird in barn (b) = 10^{-24} cm^2 angegeben.

Beim Neutroneneinfangprozeß (n, γ) nimmt der Wirkungsquerschnitt mit abnehmender Neutronengeschwindigkeit v zu ($1/v$ -Gesetz). Im Gebiet bestimmter Neutronenenergien ($\sim 0,1 - 100 \text{ eV}$) ist er in einem sehr engen Energiebereich oft ungewöhnlich hoch (Resonanzeinfang). Für alle Kernprozesse lassen sich Wirkungsquerschnitte definieren, welche auf ein bestimmtes Ausgangs- und Endnuklid bezogen werden. Die Kernreaktionsart, für welche die Angabe eines Wirkungsquerschnittes gilt, wird als Index angegeben.

Z. B.: σ_{np} = Querschnitt für die (n, p) -Reaktion

σ_{act} = Querschnitt für die (n, γ) -Reaktion (Aktivierung)

σ_{abs} = Absorptionsquerschnitt.

Der in der Nuklidkarte unterhalb des chemischen Atomgewichtes jedes Elements angegebene Wirkungsquerschnitt σ bezieht sich auf den Einfang thermischer Neutronen durch das natürliche Element, er ist also ein Absorptionsquerschnitt σ_{abs} . Die bei den Nukliden angegebenen Querschnitte sind Aktivierungsquerschnitte, wenn der entstehende Kern radioaktiv ist, und Absorptionsquerschnitte, wenn das gebildete Nuklid stabil ist. Querschnitte für spezielle Kernreaktionen sind durch den entsprechenden Index gekennzeichnet, z. B. σ_{np} oder $\sigma_{n\alpha}$. Entstehen bei der Aktivierung Isomere, so sind die Wirkungsquerschnitte für jedes Isomer getrennt angegeben und zwar zuerst für den angeregten und dann für den Grundzustand, z. B. σ_{16+20} .

Radioaktivität

Alle instabilen Nuklide gehen durch Aussendung von α -Teilchen oder β -Teilchen (Negatronen, Positronen) oder auch durch Elektroneneinfang nach einem oder mehreren radioaktiven Übergängen schließlich in einen stabilen Kern über, oft zusätzlich unter Emission von γ -Strahlen. Der Zerfall erfolgt spontan und gehorcht statistischen Gesetzen.

Die Zahl der Zerfälle in absoluten Einheiten (1 curie = $3,7 \cdot 10^{10}$ Zerfälle pro Sekunde; 1 mc (Millicurie) = 10^{-3} c ; 1 μc (Microcurie) = 10^{-6} c), bezieht sich immer auf die Zahl der zerfallenden Kerne der Muttersubstanz. Die Einheit Curie sagt weder über die Zahl der emittierten Teilchen noch über deren Art oder Energie etwas aus.

Die Zahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Kerne einer bestimmten

Kernart $\left(-\frac{dN}{dt}\right)$ hängt von der Anzahl der noch vorhandenen Kerne (N) ab.

Es gilt:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

oder integriert:

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

$N(0)$ = Anzahl der Kerne zur Zeit 0

$N(t)$ = Anzahl der Kerne zur Zeit t

λ = Zerfallskonstante

Der Ausdruck λN wird auch „absolute Aktivität“ oder Zerfallsrate Z genannt und gibt die Zahl der pro Zeiteinheit zerfallenden Kerne eines Nuklids an (Einheit curie).

Die allgemeine Zerfallsgleichung lautet dann:

$$Z(t) = Z(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

$Z(t)$ = Zerfälle pro Zeiteinheit zur Zeit t

$Z(0)$ = Zerfälle pro Zeiteinheit zur Zeit 0

λ = Zerfallskonstante

Zwischen der für jeden Kern charakteristischen Zerfallskonstanten und seiner Halbwertszeit ($t_{1/2} = T$), d. h. der Zeit, in der gerade die Hälfte aller vorhandenen Kerne eines Nuklids zerfallen ist, besteht folgender Zusammenhang:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Zeigt ein Nuklid einen Verzweigungszerfall, so wird für jede Zerfallsart eine partielle Zerfallskonstante definiert. Ist das durch radioaktiven Zerfall gebildete Tochternuklid gleichfalls radioaktiv, so wird sein Aktivitätsverlauf durch folgende Gleichung beschrieben:

$$Z_T(t) = Z_M(0) \frac{T_M}{T_M - T_T} (e^{-\lambda_M t} - e^{-\lambda_T t}).$$

Die Indexbuchstaben T bzw. M bedeuten „Tochter“ bzw. „Mutter“.

Ist die Halbwertszeit T_M sehr viel größer als T_T , so ergibt sich die vereinfachte Beziehung:

$$Z_T(t) = Z_M(1 - e^{-\lambda_T t}).$$

In diesem Fall ist die Bildungsrate der Tochteraktivität gleich der Zerfallsrate der Mutter, die bei sehr langer Halbwertszeit T_M konstant ist.

Ähnlich wie im vorigen Fall kann der Aktivitätsanstieg eines durch eine Kernreaktion gebildeten Radionuklids beschrieben werden, da die Bildungsrate des Radionuklids in einem konstanten Partikelstrom gleichfalls konstant ist.

$$Z(t) = N \Phi \sigma (1 - e^{-\lambda t})$$

$Z(t)$: Zahl der Zerfälle pro Zeiteinheit zur Zeit t

N : Zahl der bestrahlten Ausgangskerne

Φ : Teilchenstrom pro cm^2 und Zeiteinheit

σ : Isotopenwirkungsquerschnitt der zum Radionuklid führenden Kernreaktionen

λ : Zerfallskonstante des Radionuklids

t : Bestrahlungszeit

N kann leicht errechnet werden, wenn die Masse des Elements bzw. der Verbindung bekannt ist.

$$N = \frac{m \cdot N_L \cdot H}{A}$$

m : Masse des Elements

N_L : Loschmidt'sche Zahl

H : Isotopenhäufigkeit in $\%/100$

A : Atomgewicht.

Wird die Zeit in Sekunden ausgedrückt und die Zahl der Zerfälle pro Sekunde durch $3,7 \cdot 10^{10}$ dividiert, so erhält man die erzeugte Aktivität in curie.

α -Zerfall

α -Teilchen sind doppelt positiv geladene Helium-Kerne. Bei ihrer Emission verringert sich die Kernladungszahl um 2, die Massenzahl um 4 Einheiten. Der α -Zerfall wird hauptsächlich bei den schwersten Kernen beobachtet. Die α -Teilchen besitzen diskrete Energien. Die Energie ist umso höher, je kürzer die Halbwertszeit ist. Sie beträgt bei den kurzlebigen α -Strahlern etwa 9 MeV und bei den langlebigen etwa 2,5 MeV.

β -Zerfall und Elektroneneinfang

Beim β -Zerfall werden negativ oder positiv geladene Elektronen (Negatronen bzw. Positronen) und Neutrinos emittiert. Daher

ändert sich die Kernladung um eine Einheit (± 1), während die Massenzahl konstant bleibt. Die Kernmasse nimmt der Zerfallsenergie entsprechend ab (Q-Wert). Die Neutrinos, die selbst keine Ladung und keine Ruhmasse besitzen, dienen als Energie- und Impulsträger.

Beim Negatronenzерfall wandelt sich ein Kernneutron in ein Kernproton um, wobei ein Negatron (β^-) ausgesandt wird, beim Positronenzерfall dagegen ein Kernproton in ein Kernneutron unter Positronenemission. Bei den Radionukliden mit Neutronen-defizit konkurriert der Positronenzерfall mit dem Hüllenelektronen-Einfang. In beiden Fällen erfolgt die Umwandlung eines Kernprotons in ein Kernneutron, einmal durch Positronenemission und einmal durch Einfang eines Elektrons der Atomhülle. Der Einfang eines Elektrons aus der innersten Elektronenschale (K-Schale) ist am wahrscheinlichsten, jedoch können auch Elektronen der äußeren Schalen L, M, N etc. mit abnehmender Wahrscheinlichkeit vom Kern eingefangen werden. Die in der Hülle entstandene Lücke wird durch Elektronenübergang aus den äußeren Schalen aufgefüllt, wobei das charakteristische Röntgenspektrum des gebildeten Elements emittiert wird.

Das Verzweigungsverhältnis zwischen Positronen-Zerfall und Hüllenelektronen-Einfang hängt ab vom Überschuß der Zerfallsenergie über die Schwellenenergie des Positronenzерfalls. Sie entspricht der Energie von 2 Elektronen-Ruhmassen, d. h. 1,02 MeV. Ist die Zerfallsenergie kleiner als 1,02 MeV, so erfolgt nur der Hüllenelektronen-Einfang. Vom Schwellenwert ab sind beide Zerfallsarten möglich, jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit der Umwandlung durch Positronenemission mit Zunahme der Zerfallsenergie.

β -Strahlen haben ein kontinuierliches Spektrum mit Energien von 0 bis zu einer Maximalenergie, da sich die Zerfallsenergie statistisch zwischen dem β -Teilchen und dem Neutrino aufteilt. Die Energie des Neutrinos ist gleich der Differenz zwischen der β -Maximalenergie und der jeweiligen Energie des β -Teilchens. Zur Kennzeichnung der β -Strahlung wird die Maximalenergie angegeben.

Im Gegensatz zum β -Zerfall werden beim Hüllenelektronen-Einfang monoenergetische Neutrinos ausgesandt.

Bei der Vereinigung des Positrons mit einem Elektron werden, aufgrund des Energie- und Impulserhaltungssatzes, 2 entgegengesetzt gerichtete Quanten von je 0,51 MeV gebildet. Daher tritt beim Positronenzерfall immer eine γ -Strahlung von 0,51 MeV auf. β -Zerfall und Elektroneneinfang sind von schwacher Bremsstrahlung begleitet. Der Endpunkt dieses kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrums wird gleichfalls in MeV angegeben und ist gleich der Energiedifferenz zwischen Mutter- und Tochterkern. Aus dem Endpunkt läßt sich die Zerfallsenergie bei einem Elektroneneinfangszерfall ermitteln. Sie ist zum Beispiel beim Fe^{55} : 0,22 MeV.

γ -Strahlung

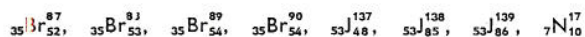
In den meisten Fällen wird die Energie der durch radioaktiven Zerfall gebildeten angeregten Tochterkerne in Form von γ -Quanten abgestrahlt. Sie kann jedoch bei niedriger Energie durch inneren Photoeffekt ein Elektron aus der Hülle freimachen (e^- Konversionselektron). Die diskrete Energie des Konversionselektrons ist gleich der Photonenenergie verringert um die Bindungsenergie des Elektrons in der betreffenden Elektronenschale.

Isomerenzerfall

Angeregten Zustand und Grundzustand eines Kerns bezeichnet man als Isomere, wenn der angeregte, metastabile Zustand eine meßbare Lebensdauer ($> 10^{-8}$ s) hat. Ist der Grundzustand stabil, so geht der metastabile Zustand durch γ -Strahlung in den Grundzustand über, wobei die γ -Strahlung durch inneren Photoeffekt konvertiert werden kann. Ist der Grundzustand instabil, so kann der metastabile Zustand auch durch Teilchenemission zerfallen, ohne vorher in den Grundzustand überzugehen.

Neutronenzerfall

Die Emission von Neutronen kommt beim radioaktiven Zerfall selten vor. Einige Neutronenstrahler wurden als Spaltprodukte der Kernspaltung aufgefunden. Ihre Halbwertszeiten liegen alle unter einer Minute. Die Neutronen werden nach einem Negatronenzerfall, der zu einem angeregten Zustand des Tochterkerns führt, spontan emittiert. Bei folgenden β -Strahlern wird aus dem angeregten Tochterkern ein Neutron abgespalten:



Keinspaltung

Die schwersten Kerne spalten von selbst. Erklärt wird diese Spontanspaltung dadurch, daß die Anziehung der Nukleonen durch die Kernkräfte und die elektrostatische Abstoßung der Kernprotonen etwa gleichgroß sind. Die Spontanspaltung ist bei den in der Natur vorkommenden Uran- und Thoriumkernen ein viel selteneres Ereignis als der radioaktive Zerfall. So kommt z. B. beim U^{238} auf 2 Mill. α -Zerfälle eine Spontanspaltung. Die Wahrscheinlichkeit, mit der die Spontanspaltung im Verhältnis zum radioaktiven Zerfall auftritt, läßt sich durch Vergleich der in der Tabelle angeführten partiellen und Gesamthalbwertszeiten ablesen (siehe Anhang: Halbwertszeiten der durch Spontanspaltung zerfallenden Nuklide).

Allgemein können die hoch angeregten Zwischenkerne schwerer Nuklide durch Spaltung in zwei mittelschwere Kerne und zwei bis drei Neutronen zerfallen oder durch Photonenemission in den Grundzustand übergehen. Zur Spaltung ist eine gewisse Energie notwendig (Aktivierungsenergie), die für die einzelnen Kernarten verschieden groß ist. Der Zerfall des Zwischenkerns durch Spaltung oder Photonenemission hängt von der Anregungsenergie ab. Je höher die Anregungsenergie ist, umso wahrscheinlicher ist die Spaltung. Nur wenige Kernarten werden durch Absorption eines thermischen Neutrons so hoch angeregt, daß die Aktivierungsenergie für die Spaltung überschritten wird, denn die Bindungsenergie des letzten Neutrons ist nur bei den sogenannten spaltbaren Kernen größer als die Aktivierungsenergie. Spaltbare Kerne sind z. B. U^{233} , U^{235} und Pu^{239} , während z. B. Th^{232} , Pa^{231} und U^{238} nur mit schnellen Neutronen spalten können.

Wegen der besonderen Bedeutung soll hier nur von der Spaltung durch thermische Neutronen gesprochen werden. In der folgenden Tabelle sind die Wahrscheinlichkeiten der Spaltung und Phonenmission durch thermische Neutronen für einige Nuklide gegenübergestellt. Außerdem ist die effektive Neutronenzahl angegeben. Sie gibt den Teil der Spaltneutronen an, die für weitere Spaltungen zur Verfügung stehen; denn ein Teil der Neutronen wird von spaltbaren Kernen eingefangen, ohne daß eine Spaltung eintritt (n, γ -Prozeß).

Wir kungsquerschnitte und Spaltneutronenzahlen für die Spalt-
nuklide U^{233} , U^{235} , Pu^{239} .

| Nuklid | σ_f (barn) | $\sigma_{n,\gamma}$ (barn) | Spaltneutronen pro Spaltung | effekt. Neutronen pro Spaltung |
|-------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| ^{233}U | 525 | 57 | 2,51 | 2,29 |
| ^{235}U | 579 | 118 | 2,46 | 2,07 |
| ^{239}Pu | 747 | 278 | 2,91 | 2,09 |

Die Energie, die bei der Spaltung eines Urankerns frei wird, ergibt sich aus dem Massendefekt zu etwa 200 MeV und teilt sich folgendermaßen auf:

| | |
|---|---------|
| Kinetische Energie der Spaltkerne | 162 MeV |
| „ „ „ Spaltneutronen | 6 „ |
| „ „ „ spontanen γ -Strahlen | 6 „ |
| γ - „ „ radioaktiven Spaltprodukte | 5 „ |
| β - „ „ radioaktiven Spaltprodukte | 5 „ |
| Neutrino- „ „ radioaktiven Spaltprodukte | 11 „ |

Spaltprodukte

Über 250 Nuklide wurden bisher als Spaltprodukte identifiziert. Es handelt sich um Isotope der 37 Elemente von Zink ($Z = 30$) bis Dysprosium ($Z = 66$) mit den Massenzahlen 72 bis 161, in der Mehrzahl radioaktive Nuklide, deren Halbwertszeiten sich stark unterscheiden. Im Mittel beträgt der Neutronenüberschuß eines primären Spaltkerns (Spaltfragment) gegenüber dem stabilen Isobar 2 bis 3 Neutronen. Es werden jedoch auch Spaltfragmente mit weitaus größerem Neutronenüberschuß gebildet. Allerdings sind sie wegen ihrer Kurzlebigkeit schwer zu identifizieren.

Bei den chemisch schnell abtrennbaren Elementen Xe, Kr, Br und J wurden bereits jeweils 10 und mehr aktive Spaltisotope identifiziert. Kerne mit Neutronendefizit werden nicht gebildet. Abgeschirmte Nuklide, d. h. Kerne, welche in der isobaren Reihe auf einen stabilen Kern folgen, werden nur sehr selten gebildet (1—2 Kerne auf über 10^5 Spaltkerne gleicher Massenzahl), da sie nur als primäre Spaltfragmente entstehen und nicht als Tochterkerne einer isobaren Reihe auftreten.

Durch stufenweisen β -Zerfall der Spaltfragmente ergeben sich isobare β -Zerfallsreihen. Die Halbwertszeiten der Glieder einer isobaren Reihe werden meist mit Zunahme der Kernladungszahl größer.

Die Spaltausbeute ist ein Maß für die Bildungswahrscheinlichkeit eines Nuklids und wird in Prozenten ausgedrückt. Sie gibt an, wie viele Kerne dieses Nuklids bei 100 Spaltungen gebildet werden. Daraus folgt, daß die Summe aller Spaltausbeuten 200% ist. Die Spaltausbeuten sind sehr unterschiedlich und hängen von der Massenzahl, der Kernart des gespaltenen Nuklids und der Energie der Neutronen ab. Die Ausbeute ändert sich bei Isobaren mit der Kernladung und hat bei einem bestimmten Neutron Proton-Verhältnis ein Maximum.

Die Entstehung eines Spaltnuklids kann auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen; einmal direkt als primäres Spaltfragment, zum anderen indirekt durch radioaktiven Zerfall eines Mutternuklids. Die Bildungswahrscheinlichkeit als primäres Spaltfragment wird als Fragmentspaltausbeute bezeichnet (independent yield). Die Gesamtausbeute eines Spaltnuklids bezeichnet man als kumulative Spaltausbeute (cumulative yield). Die kumulativen Ausbeuten der letzten Glieder einer isobaren Reihe sind bis auf Bruchteile eines Prozents gleich. Man kann diese kumulative Ausbeute daher als Isobarenspaltausbeute betrachten (total fission chain yield). Einen Überblick über alle Spaltnuklide, isobaren Spaltreihen und Spaltausbeuten gibt die beiliegende Tabelle der Spaltprodukte.

Die Numerierung der Einzelblätter in der geschnittenen Ausgabe der Nuklidkarte erfolgte in der angegebenen Reihenfolge:

| | | | |
|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | 6 | 7 | 8 |
| 9 | 10 | 11 | 12 |
| 13 | 14 | 15 | 16 |

Die natürlichen radioaktiven Familien

| Tl | Pb | Bi | Po | At | Em | Fr | Ra | Ac | Th | Pa | U |
|--|---|---|--|--|---------------------------|------------|---|---|---|----|----|
| 81 | 82 | 83 | 84 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 |
| Thorium-Familie $A = 4n$ | | | | | | | $^{228}\text{MsTh}_1$ 6,7 a α^- | α^- | ^{232}Th $1,39 \cdot 10^{10}$ a | | |
| | | | | | | | | $^{228}\text{MsTh}_2$ 6,1 h α^- | | | |
| | ^{212}ThB 10,6 h α^- | α^- (~100%) | ^{216}ThA 0,16 s α^- | α^- | ^{220}Tn 52 s | α^- | ^{224}ThX 3,64 d | α^- | $^{228}\text{RdTh}$ 1,9 a | | |
| $^{208}\text{ThC}''$ 3,1 m α^- | α^- (36,2%) | ^{212}ThC 60,5 m α^- | α^- (0,043%) | ^{216}At $3 \cdot 10^{-4}$ s | | | | | | | |
| | ^{208}ThD stabil | α^- (63,8%) | $^{212}\text{ThC}'$ $3 \cdot 10^{-7}$ s | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|
| Actinium-Familie $A = 4n + 3$ | | | | | | | | | ^{231}UY 25,6 h α^- | α^- | ^{235}AcU $7,1 \cdot 10^8$ a |
| | | ^{215}Bi 8 m α^- | α^- (99%) | ^{219}At 0,9 m α^- | α^- ($4 \cdot 10^{-3}$ %) | ^{223}AcK 22 m α^- | α^- (1,2%) | ^{227}Ac 22 a α^- | α^- | ^{231}Pa $3,4 \cdot 10^4$ a | |
| | ^{211}AcB 36,1 m α^- | α^- (~100%) | ^{215}AcA $1,8 \cdot 10^{-3}$ s | α^- (3%) | ^{219}An 3,9 s | α^- (~100%) | ^{223}AcX 11,6 d | α^- (98,8%) | $^{227}\text{RdAc}$ 18,2 d | | |
| $^{207}\text{AcC}''$ 4,73 m α^- | α^- (99,68%) | ^{211}AcC 2,15 m α^- | α^- ($5 \cdot 10^{-4}$ %) | ^{215}At 10^{-4} s | | | | | | | |
| | ^{207}AcD stabil | α^- (0,32%) | $^{211}\text{AcC}'$ 0,52 s | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|--|----------------------------|----------------------------|------------|-----------------------------|------------|--|------------|---|
| Uran-Familie $A = 4n + 2$ | | | | | | | | | $^{234}\text{UX}_1$ 24,1 d α^- | α^- | $^{238}\text{U}_I$ $4,5 \cdot 10^9$ a |
| | | | | | | | | | $^{234}\text{UZ/UX}_2$ 6,7 h α^- (99,85%) 1,2 m β^- (0,15%) | | |
| | ^{214}RaB 26,8 m α^- | α^- (99,98%) | ^{218}RaA 3,05 m α^- | α^- | ^{222}Rn 3,8 d | α^- | ^{226}Ra 1620 a | α^- | ^{230}Io $8 \cdot 10^4$ a | α^- | $^{234}\text{U}_{II}$ $2,5 \cdot 10^5$ a |
| $^{210}\text{RaC}''$ 1,32 m α^- | α^- (10,04%) | ^{214}RaC 19,7 m α^- | α^- (0,02%) | ^{218}At 1,3 s | | | | | | | |
| | ^{210}RaD 19,4 a α^- | α^- (99,96%) | $^{214}\text{RaC}'$ $1,6 \cdot 10^{-4}$ s | | | | | | | | |
| $^{206}\text{RaE}''$ 4,2 m α^- | α^- ($5 \cdot 10^{-6}$ %) | ^{210}RaE 50 d α^- | | | | | | | | | |
| | ^{206}RaG stabil | α^- (~100%) | ^{210}RaF 138,5 d | | | | | | | | |

Spaltprodukte, die bei der Spaltung des U^{235} mit thermischen Neutronen gebildet werden

| Spaltenspalten in % | | | | Spaltenspalten in % | | | |
|---------------------|------------|----------|----|---------------------|------------|----------|-----|
| Isobaren | kumulative | Fragment | Z | Isobaren | kumulative | Fragment | Z |
| | | | 70 | | | | 117 |
| | | | 71 | | | | 118 |
| | | | 72 | | | | 119 |
| | | | 73 | | | | 120 |
| | | | 74 | | | | 121 |
| | | | 75 | | | | 122 |
| | | | 76 | | | | 123 |
| | | | 77 | | | | 124 |
| | | | 78 | | | | 125 |
| | | | 79 | | | | 126 |
| | | | 80 | | | | 127 |
| | | | 81 | | | | 128 |
| | | | 82 | | | | 129 |
| | | | 83 | | | | 130 |
| | | | 84 | | | | 131 |
| | | | 85 | | | | 132 |
| | | | 86 | | | | 133 |
| | | | 87 | | | | 134 |
| | | | 88 | | | | 135 |
| | | | 89 | | | | 136 |
| | | | 90 | | | | 137 |
| | | | 91 | | | | 138 |
| | | | 92 | | | | 139 |
| | | | 93 | | | | 140 |

| Y 5,4 Zr 6,40 | | Zr 1,0 | | 94 | 1s K | | 2 m 17 m | | 17 s K | | 18 m 38 h 32 d | | 141 | | Xe 1,4 Ba 6,3 Ce 5,95 | |
|------------------|---|-------------------------|--|-----|---------|--|--|--|--------|--|-----------------------|--|-----|--|--|--|
| 6,27 | | | | 95 | K K | | 10 m 65 d | | | | 6 m 77 m | | 142 | | Ce 5,95 | |
| 6,33 | | Nb 5,7·10 ⁻⁴ | | 96 | | | 23 h | | 1 s K | | 405 m 49 m 33 h 138 d | | 143 | | Xe 5,1·10 ⁻² Ce 5,7 Nd 5,98 | |
| 6,09 | Zr 5,9 Mo 6,09 | | | 97 | 0,8 s K | | 60 s 177 h 72 m | | | | 386 d 17 m 540 a | | 144 | | Ce 5,0 Nd 5,67 | |
| 5,78 | Mo 5,78 | | | 98 | | | 30 m | | | | 30 m 59 h | | 145 | | Nd 3,95 | |
| | Mo 6,06 | | | 99 | 30 s | | 67 h 24 m | | | | 44 m 24 m | | 146 | | Nd 3,07 | |
| 6,30 | Mo 6,30 | | | 100 | | | | | | | | | 147 | | Nd 2,7 Sm 2,38 | |
| 5,0 | Mo 5,6 Ru 5,0 | | | 101 | | | 4,6 m 4,3 m | | | | | | 148 | | Nd 1,7 | |
| 4,1 | Mo 4,3 Ru 4,1 | | | 102 | 41 m | | 41 m 5 s | | | | 18 h 50 h | | 149 | | Sm 1,13 | |
| | Ru 3,0 | | | 103 | | | 1,2 m 138 d | | | | | | 150 | | Nd 0,67 | |
| 1,8 | Ru 1,8 | | | 104 | | | 18 m | | | | | | 151 | | Sm 0,15 | |
| | Ru 0,9 | | | 105 | | | 10 m 4,5 h | | | | 15 m 27 h 80 a | | 152 | | Sm 0,29 | |
| | Ru 0,38 | | | 106 | | | 1,0 a | | | | 47 h | | 153 | | Sm 0,15 | |
| | Rh 0,9 | | | 107 | | | 4,8 m 23 m 140 s 77 s | | | | | | 154 | | Sm 7,7·10 ⁻² 7,7·10 ⁻² | |
| | Pd 0,03 | | | 108 | | | 44 m 175 s | | | | 23 m 17 a | | 155 | | Sm 3,3·10 ⁻² Eu 3,3·10 ⁻² | |
| | | | | 109 | | | 8 m 136 h | | | | 40 h 4 d | | 156 | | Sm 1,3·10 ⁻² Eu 1,4·10 ⁻² | |
| | | | | 110 | | | 3 s | | | | 15 h | | 157 | | Eu 7,8·10 ⁻³ | |
| | Ag 1,9·10 ⁻² | | | 111 | | | 55 h 175 s 22 m 75 d | | | | 60 m | | 158 | | Eu 2·10 ⁻³ | |
| | Pd 1,0·10 ⁻² | | | 112 | | | 21 h 31 h | | | | 18 h | | 159 | | 6d 1,07·10 ⁻³ | |
| | | | | 113 | | | 15 m 53 h | | | | | | 160 | | | |
| | | | | 114 | | | 24 m 2 m | | | | 37 m 71 d | | 161 | | Tb 7,6·10 ⁻⁵ | |
| | Ag 7,7·10 ⁻³ Cd 0,7·10 ⁻³ Cd 9,7·10 | | | 115 | | | 20 s 42 d 45 s 24 m 54 h 6·10 ⁻⁵ | | | | | | 162 | | | |
| | | | | 116 | | | 25 m | | | | | | 163 | | | |
| | Cd 1,1·10 ⁻² | | | 117 | | | 11 m 307 d 19 h 4 d 66 m | | | | | | 164 | | | |

Halbwertszeiten der durch Spontanspaltung zerfallenden Nuklide

| Nuklid | Halbwertszeit der spontanen Spaltung | Halbwertszeit | Zerfallsart | Nuklid | Halbwertszeit der spontanen Spaltung | Halbwertszeit | Zerfallsart |
|-------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| ^{230}Th | $\geq 1,5 \cdot 10^{17} \text{ a}$ | $8 \cdot 10^4 \text{ a}$ | α, γ | ^{246}Cm | $2,0 \cdot 10^7 \text{ a}$ | 6 600 a | α |
| ^{232}Th | $> 10^{20} \text{ a}$ | $1,39 \cdot 10^{10} \text{ a}$ | α, γ, e^- | ^{248}Cm | $4,6 \cdot 10^6 \text{ a}$ | $5 \cdot 10^5 \text{ a}$ | α |
| ^{232}U | $\sim 8 \cdot 10^{13} \text{ a}$ | 74 a | α, γ, e^- | ^{250}Cm | $2 \cdot 10^4 \text{ a}$ | $> 130 \text{ a}$ | α |
| ^{234}U | $2 \cdot 10^{16} \text{ a}$ | $2,5 \cdot 10^5 \text{ a}$ | α, γ, e^- | ^{249}Bk | $> 1,5 \cdot 10^9 \text{ a}$ | 314 d | β^-, α, γ |
| ^{235}U | $1,9 \cdot 10^{17} \text{ a}$ | $7,1 \cdot 10^8 \text{ a}$ | α, γ | ^{246}Cf | 2 100 a | 36 h | α, γ, e^- |
| ^{236}U | $2 \cdot 10^{16} \text{ a}$ | $2,39 \cdot 10^7 \text{ a}$ | α, γ, e^- | ^{248}Cf | $\geq 1,5 \cdot 10^4 \text{ a}$ | 350 d | α |
| ^{238}U | $8,0 \cdot 10^{15} \text{ a}$ | $4,5 \cdot 10^9 \text{ a}$ | α, γ, e^- | ^{249}Cf | $1,5 \cdot 10^9 \text{ a}$ | 360 a | α, γ |
| ^{236}Pu | $3,5 \cdot 10^9 \text{ a}$ | 2,85 a | α, γ, e^- | ^{250}Cf | $\sim 1,5 \cdot 10^4 \text{ a}$ | 10,9 a | α, γ |
| ^{238}Pu | $4,9 \cdot 10^{10} \text{ a}$ | 86,4 a | α, γ | ^{252}Cf | 66 a | 2,6 a | α, γ |
| ^{239}Pu | $5,5 \cdot 10^{15} \text{ a}$ | 24 300 a | α, γ | ^{254}Cf | 56 d | — | — |
| ^{240}Pu | $1,2 \cdot 10^{11} \text{ a}$ | 6 600 a | α, γ | ^{253}Es | $7 \cdot 10^5 \text{ a}$ | 20 d | α, γ |
| ^{242}Pu | $7 \cdot 10^{10} \text{ a}$ | $3,8 \cdot 10^5 \text{ a}$ | α | ^{254}mEs | $> 10 \text{ a}$ | 37 h | $\beta^-, \text{K}, \gamma$ |
| ^{244}Pu | $2,5 \cdot 10^{10} \text{ a}$ | $\sim 7,6 \cdot 10^7 \text{ a}$ | α | ^{252}Fm | $> 8 \text{ a}$ | 30 h | α |
| ^{240}Cm | $7,9 \cdot 10^5 \text{ a}$ | 27 d | α | ^{254}Fm | 246 d | 3,24 h | α, γ |
| ^{242}Cm | $7,2 \cdot 10^6 \text{ a}$ | 162 d | α, γ | ^{255}Fm | $> 60 \text{ a}$ | 21,5 h | α, γ |
| ^{244}Cm | $1,4 \cdot 10^7 \text{ a}$ | 18 a | α, γ | ^{256}Fm | $\sim 3 - 4 \text{ h}$ | — | — |

Liste der Elemente

| Element | Symbol | Ord-nungs-zahl | Element | Symbol | Ord-nungs-zahl | Element | Symbol | Ord-nungs-zahl | Element | Symbol | Ord-nungs-zahl |
|-------------|--------|----------------|-------------|--------|----------------|--------------|--------|----------------|-------------|--------|----------------|
| Actinium | Ac | 89 | Fermium | Fm | 100 | Natrium | Na | 11 | Scandium | Sc | 21 |
| Aluminium | Al | 13 | Fluor | F | 9 | Neodym | Nd | 60 | Schwefel | S | 16 |
| Americium | Am | 95 | Francium | Fr | 87 | Neon | Ne | 10 | Selen | Se | 34 |
| Antimon | Sb | 51 | Gadolinium | Gd | 64 | Neptunium | Np | 93 | Silber | Ag | 47 |
| Argon | Ar | 18 | Gallium | Ga | 31 | Neutron | n | 0 | Silicium | Si | 14 |
| Arsen | As | 33 | Germanium | Ge | 32 | Nickel | Ni | 28 | Stickstoff | N | 7 |
| Astatin | At | 85 | Gold | Au | 79 | Niob | Nb | 41 | Strontium | Sr | 38 |
| Barium | Ba | 56 | Hafnium | Hf | 72 | Nobelium | No | 102 | Tantal | Ta | 73 |
| Berkelium | Bk | 97 | Helium | He | 2 | Osmium | Os | 76 | Technetium | Tc | 43 |
| Beryllium | Be | 4 | Holmium | Ho | 67 | Palladium | Pd | 46 | Tellur | Te | 52 |
| Blei | Pb | 82 | Indium | In | 49 | Phosphor | P | 15 | Terbium | Tb | 65 |
| Bor | B | 5 | Iridium | Ir | 77 | Platin | Pt | 78 | Thallium | Tl | 81 |
| Brom | Br | 35 | Jod | J | 53 | Plutonium | Pu | 94 | Thorium | Th | 90 |
| Cadmium | Cd | 48 | Kalium | K | 19 | Polonium | Po | 84 | Thulium | Tm | 69 |
| Caesium | Cs | 55 | Kobalt | Co | 27 | Praseodym | Pr | 59 | Titan | Ti | 22 |
| Calcium | Ca | 20 | Kohlenstoff | C | 6 | Promethium | Pm | 61 | Uran | U | 92 |
| Californium | Cf | 98 | Krypton | Kr | 36 | Protaktinium | Pa | 91 | Vanadium | V | 23 |
| Cer | Ce | 58 | Kupfer | Cu | 29 | Quecksilber | Hg | 80 | Wasserstoff | H | 1 |
| Chlor | Cl | 17 | Lanthan | La | 57 | Radium | Ra | 88 | Wismut | Bi | 83 |
| Chrom | Cr | 24 | Lithium | Li | 3 | Radon | Rn | 86 | Wolfram | W | 74 |
| Curium | Cm | 96 | Lutetium | Lu | 71 | Rhenium | Re | 75 | Xenon | Xe | 54 |
| Dysprosium | Dy | 66 | Magnesium | Mg | 12 | Rhodium | Rh | 45 | Ytterbium | Yb | 70 |
| Einsteinium | Es | 99 | Mangan | Mn | 25 | Rubidium | Rb | 37 | Yttrium | Y | 39 |
| Eisen | Fe | 26 | Mendelevium | Md | 101 | Ruthenium | Ru | 44 | Zink | Zn | 30 |
| Erbium | Er | 68 | Molybdän | Mo | 42 | Samarium | Sm | 62 | Zinn | Sn | 50 |
| Eurpium | Eu | 63 | | | | Sauerstoff | O | 8 | Zirkonium | Zr | 40 |